

改質再生骨材を用いたコンクリートの物性把握

伊代田岳史（芝浦工業大学工学部土木工学科）

松田信広（株式会社東京テクノ）

伊藤孝文（芝浦工業大学大学院建設工学専攻）

太田真帆（芝浦工業大学大学院建設工学専攻）

1. はじめに

環境負荷低減および循環型社会の構築に向けては、コンクリート用再生骨材および再生骨材コンクリートの普及促進が望まれる。今後、既存構造物の維持管理を考えた場合、多くの構造物が更新されることが想定されており、解体コンクリートが大量に発生すると考えられる。また、構造物建設においてもレディーミクストコンクリートの運搬等において発生する、残コンクリートや戻りコンクリートの処理も大きな負荷がかかることも報告されている。これらの解体および残コンクリートは産業廃棄物であるために適切に処理する必要がある、その一つとして、コンクリート用の再生骨材として利用することがゼロエミッションの観点からもコンクリート業界としては最適であると考えられる。しかしながら、この再利用をするために高いエネルギーやコストをかけることは、反対に環境負荷に直接的につながる恐れがあり、注意が必要である。

さらに世界的な地球温暖化問題において、温室効果ガスであるといわれる二酸化炭素の排出量を削減することは、非常に重要である。コンクリート関連分野ではセメント製造において、エネルギーおよび非エネルギー起源による二酸化炭素排出量が問題となり、国内製造業でも2番目の排出量であるといわれる。そのため、コンクリート産業分野全体においても、二酸化炭素排出量削減に向けた新たな取り組みが必要であると考えられる。

そこでできる限り、低エネルギー・低コストで再生骨材を製造するとともに、その一方でセメント製造時の二酸化炭素排出量を削減できる技術が必要となる。ここでは、再生骨材製造に着目し、低品質の再生骨材に炭酸化技術を適用して改質した再生骨材の製造とその骨材を用いたコンクリートの特性を検討することを目的とした。また、その改質効果の評価とともに改質メカニズムについても考察を加えた。

2. 炭酸化技術と炭酸化手法

2.1 炭酸化技術

水酸化カルシウムは、二酸化炭素を吸着することで炭酸カルシウムを生成することが知られている。コンクリートにおいては、大気中の二酸化炭素がコンクリートに浸透することで、コンクリート中の水和生成物である水酸化カルシウムが、二酸化炭素を吸着し炭酸カルシウムを生成する。このことは、コンクリートが二酸化炭素を吸収する能力を所有することを意味している。この現象は炭酸化と呼ばれるが、コンクリートの分野における炭酸化は、必ずしも良いこととは言えない。コンクリート中における鉄筋は、通常アルカリ性の中では不働態被膜という薄い酸化被膜が存在し、腐食しにくい状態にある。二酸化炭素を吸着しコンクリートが炭酸化すれば、アルカリ性であったコンクリートは徐々に中性へと移行する。これを中性化と呼んでおり、中性化が進行することで不働態被膜が破壊されると水や酸素の供給によりコンクリート中の鉄筋も腐食し、構造物の耐力低下につながる。しかしなが

ら、コンクリートだけに着目すると、一般的に炭酸化により水酸化カルシウムが炭酸カルシウムとなると体積が大きくなるため、生成した炭酸カルシウムが空隙を緻密化する効果も確認されている。そのため、粗大な空隙が緻密化し、コンクリート自体の強度や物質移動抵抗性が向上することが知られている。そこで、再生骨材に付着しているモルタル部を緻密化できれば、再生骨材コンクリートの欠点である強度低下や低い物質移動抵抗性を解消できるのではないかと考えた。

2.2 再生骨材の改質

再生骨材はその品質に応じて、JIS A 5021 および JIS A 5308 付属書において H,M,L のクラス分けとそのコンクリートの規定が行われている。その指標は、絶乾密度と吸水率により整理がなされている。高品質な再生骨材 H は、コンクリート骨材として利用可能であるが、製造には高いコストと多くのエネルギーを必要とする。一方で、再生骨材 M および L では、一般的にはコンクリート骨材として利用することは困難であり、土間均しコンクリートや地下の躯体コンクリートにしか利用できない。しかしながら、製造にはコストやエネルギーが小さくてすむ。今後、再生骨材が普及するためには、高品質な再生骨材をコストやエネルギーを低くして製造する必要があると考えられる。そこでこのように低コスト・低エネルギーで製造した低品質再生骨材を上記で紹介した炭酸化技術を用いて改質を試みた²⁾。ここでは、強制炭酸化をするために促進炭酸化装置（温度 20℃、湿度 60%RH、CO₂ 濃度 5%）にて 7 日間で炭酸化させた。このとき、2 日に 1 回の割合で試料をかき混ぜて、骨材全体に CO₂ 吸着がいき渡るようにした。本研究において用いた再生骨材の一覧を表-1 に、改質前後の再生骨材の物性値の一覧を表-2 に示す。骨材は、解体コンクリートから製造した粗骨材 M,L ならびに戻りコンクリート・残コンクリートを用いた L 以下（規格外）

表-1 本研究で利用した再生骨材一覧

	記号	class	製造方法		原コンクリート
			破碎	磨砕	
粗骨材	N	砕石			砕石
	MA	M	○	○	解体
	MB		○	○	解体*
	MC		○	○	解体*
	MD		○	○	解体*
	LA	L	○	—	解体
	LB		○	—	解体
	LC		○	—	解体
	LD		○	—	解体
	OA	規格外	○	—	戻り
OB	○		—	戻り	
細骨材	NS	砕砂			砕砂
	MS	M			解体*
	LS	L			解体
	OS	規格外			戻り

*一部、戻りコンクリートを含む

表-2 炭酸化技術を用いた改質前後の再生骨材の物性

	改質前骨材						改質後骨材(炭酸化処理)						
	記号	class	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	破碎値	モルタル混入率(%)	表乾密度 (g/cm ³)	記号	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	破碎値	モルタル混入率(%)	表乾密度 (g/cm ³)
粗骨材	N	砕石			-	-	2.71						
	MA	M	2.50	3.06	7.9	15.10	2.57	CMA	2.52	2.63	6.0	15.13	2.59
	MB		2.51	3.01	7.8	19.69	2.58	CMB	2.53	2.27	6.4	18.02	2.59
	MC		2.44	3.94	8.7	28.51	2.54	CMC	2.46	3.38	7.7	28.53	2.54
	MD		2.43	3.47	7.9	21.7	2.52	CMD	2.44	3.38	8.0	22.0	2.52
	LA	L	2.32	5.69	11.4	40.95	2.45	CLA	2.3	4.97	11.0	42.94	2.46
	LB		2.35	5.66	13.6	40.82	2.49	CLB	2.4	4.61	13.2	40.97	2.51
	LC		2.24	6.13	13.9	42.9	2.38	CLC	2.28	5.56	11.6	34.7	2.40
	LD		2.26	6.82	18.3	57.05	2.42	CLD	2.27	6.18	17.8	57.00	2.41
	OA	規格外	2.21	7.44	17.3	53.94	2.37	COA	2.3	5.88	16.4	56.31	2.41
OB	2.00		10.79	18.8	60.2	2.22	COB	2.09	7.53	19.0	60.9	2.25	
細骨材	NS	砕砂			-	-	2.61						
	MS	M	2.34	4.80	8.4	-	2.46	CMS	2.35	4.68	6.1	-	2.46
	LS	L	1.94	12.92	12.8	-	2.20	CLS	1.97	12.18	11.7	-	2.21
	OS	規格外	1.92	14.57	16.1	-	2.20	COS	1.95	12.87	13.6	-	2.20

*ハッチングは破碎値からの推定値

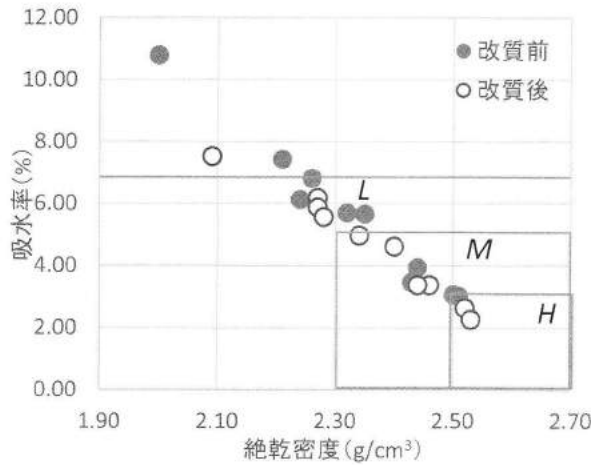


図-1 改質前後の物性変化（クラス分け）

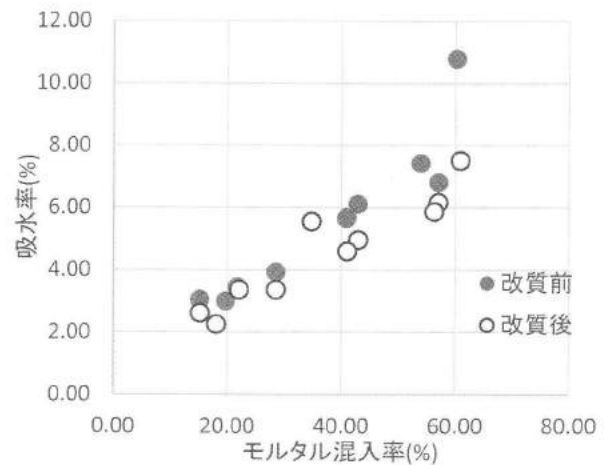


図-2 改質前後のモルタル混入率と吸水率

を用いた。図-1 に炭酸化により改質前後の物性を示す。これより全ての骨材において、密度および吸水率が改善しており、クラスアップしている骨材も存在する。このように炭酸化による骨材品質の改質は可能であると考えられる。図-2 には再生粗骨材におけるモルタル混入率と吸水率の関係を示した。なお、モルタル混入率は実測のものとして文献³⁾を参考に破砕値から算出したものを含む。強制炭酸化によりモルタルの量は大きくは変化していないが、吸水率が改質されていることがわかる。また、その関係性は一義的であることをもわかる。

表-3 長さ変化に用いたコンクリートの種類

記号	CO ₂ 吸着	粗骨材	細骨材	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
NN	—	N	NS	11.0	5.9	28.9
LAN	なし	LA	NS	8.0	5.0	30.6
LBN		LB	NS	11.5	5.3	29.4
LCN		LC	NS	9.5	4.5	27.1
LCL		LC	LS	12.0	5.5	21.3
OAN		OA	NS	12.0	5.4	27.9
OBO		OB	OS	10.5	5.9	22.0
CLAN	あり	CLA	NS	11.5	5.5	27.2
CLBN		CLB	NS	12.0	5.7	28.4
CLCN		CLC	NS	9.0	5.0	25.6
CLCCL		CLC	CLS	10.0	4.8	22.9
COAN		COA	NS	9.0	3.5	28.5
COBCO	COB	COS	7.0	6.5	20.1	

3. コンクリートに適用した改質骨材の改質効果

3.1 使用材料と配合

改質前後の再生骨材を用いてコンクリートを製造し、圧縮強度、長さ変化試験を実施した。コンクリートの配合は高炉セメント B 種を用いた W/C50%とし s/a50%、単位水量 170kg/m³ で一定とした。使用した骨材は、圧縮強度および割裂強度に関しては、すべての粗骨材を用いてコンクリートを作製した。なお細骨材は砕砂を用いている。一方長さ変化については圧縮強度試験で効果が認められた L および規格外の骨材を中心に、2.2 から粗骨材を LA, LB, LC および OA, OB, 細骨材を OA, OB を用いて表-3 に示した組み合わせでコンクリートを作製した。また表にはフレッシュコンクリートのスランプ・空気量と圧縮強度の測定結果も併記した。フレッシュ性状においては特に大きな問題は顕在化しなかった。

3.2 コンクリートを用いた試験項目

骨材の改質による物理的な特性を把握するために、JIS に準拠した圧縮強度および割裂引張強度試験を実施した。試験体はφ100×200mm の円柱試験体であり、標準養生 28 日後に 3 本の試験を実施し、その平均値により強度を算出した。

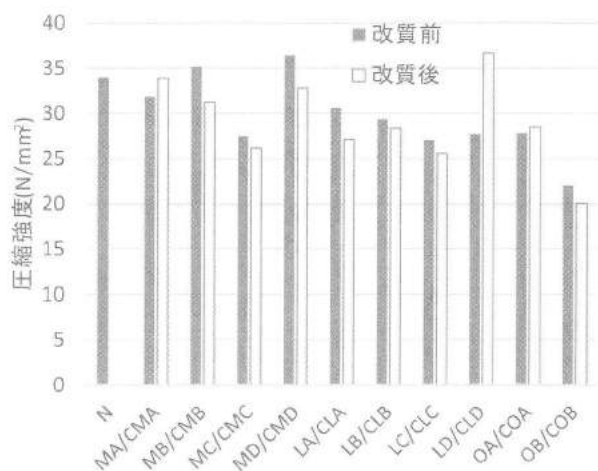


図-3 改質前後での圧縮強度の結果

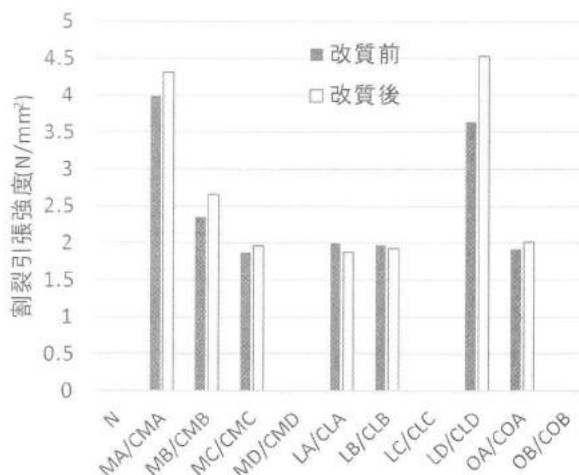


図-4 改質前後での割裂引張強度の結果

次に、再生骨材コンクリートで問題となりうる、コンクリートの乾燥収縮試験を JIS A 1129-3 に準拠して実施した。打込み後 1 日で脱枠し、水中養生 7 日後から温度 20℃、湿度 60%RH の環境にて静置し、乾燥開始から 1,2,4,8,13 週での長さ変化を計測した。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 圧縮試験と割裂引張試験結果

図-3,4 は圧縮・割裂引張強度の結果を示す。改質した骨材を用いたコンクリートの強度特性は、大幅に改善は示さないものの、改質前の再生骨材コンクリートと比べて同程度かやや強度が発現していることがわかる。特に L 骨材および規格外 (O) の骨材を用いることで改質効果が著しくみられる。割裂引張強度については改質効果が比較的高いと感じられる。

3.3.2 長さ変化試験結果

図-5 は乾燥材齢 8 週 (56 日) における長さ変化試験の結果である。長さ変化率は、CO₂ 吸着によって、全ての配合で小さくなる結果が得られ、普通骨材を使用したコンクリートに比べ小さくなるものも確認された。これらは、CO₂ 吸着によって再生骨材が改質することで長さ変化率が小さくなったものとする。また、再生細骨材を使用している LCL は、使用していない LCN と比較して長さ変化率は大きくなった。粗骨材および細骨材ともに再生骨材を使用したコンクリートは、粗骨材のみ再生骨材を使用したコンクリートよりも長さ変化率は大きくなる傾向^{4,5)}にあり、本研究においても同様の傾向が確認された。なお、再生細骨材を用いたコンクリートにおいても、再生粗骨材のみを使用したコンクリートと同様に CO₂ 吸着に

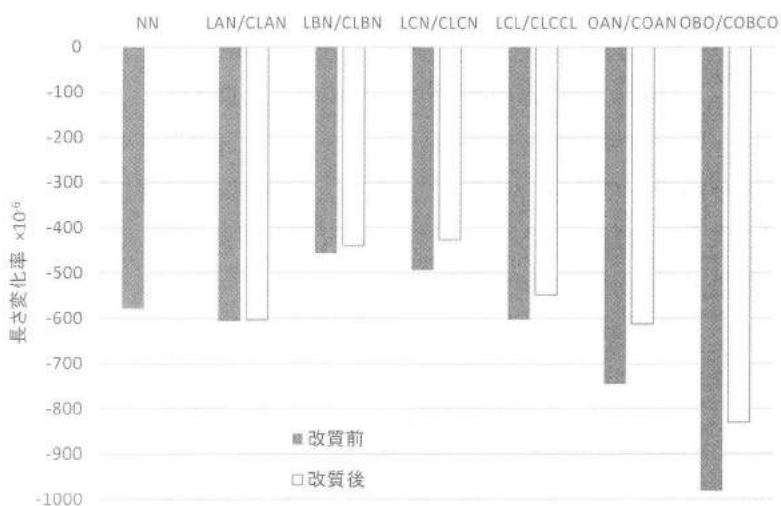


図-5 改質前後による長さ変化試験の結果

よる改善効果が確認された。改質効果が大きく認められたのは、規格外（O）を改質した COAN および COBCO のコンクリートであった。これらの再生骨材は戻りコンクリートを用いていることから、供用期間が長期に渡っている解体コンクリートよりも、製造から時間が経っていない若いコンクリートの方が、改質効果が期待できると考えられる。

4. 改質再生骨材の乾燥収縮低減メカニズムの検討

特に戻りコンクリートなどを用いた若いコンクリートほど骨材の改質効果が高く、乾燥収縮を抑制できるメカニズムを検討するために、再生骨材の吸着 CO₂ 量を測定した結果を図-6 に示す。これより CO₂ 吸着量は低品質骨材で若いコンクリートほど多いことがわかった。次に改質された再生骨材の空隙量をアルキメデス法により測定した結果を図-7 に示す。いずれの骨材においても明らかに空隙が減少しており、緻密化していることが理解できる。そこで、SEM を用いた空隙内の生成物を観察したところ、図-8 のように炭酸カルシウムの生成が確認できた。このことから炭酸化によるモルタル部の緻密化が吸水率の改善および乾燥収縮低減に効果があることが確認できた。

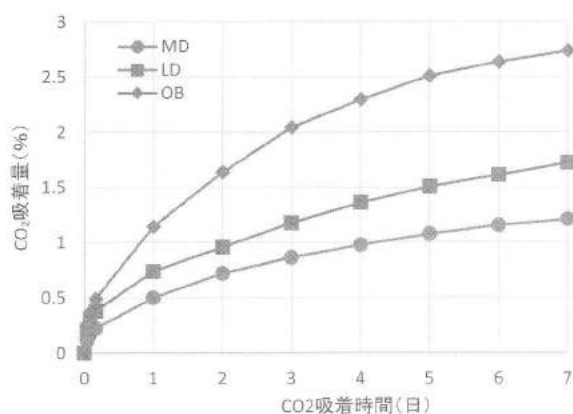


図-6 CO₂吸着量の結果

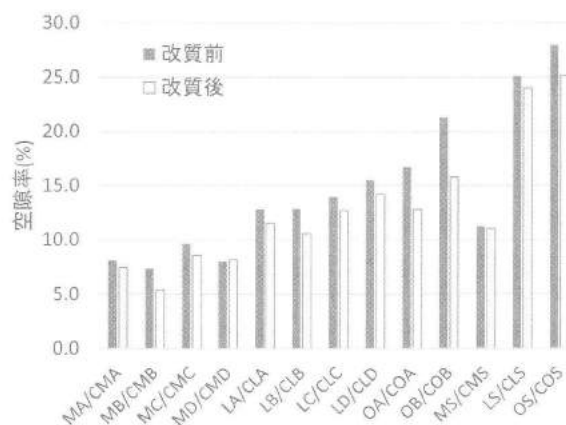


図-7 空隙率の測定結果

5. 炭酸化技術による骨材改質の将来展望

このように炭酸化により低品質再生骨材を改質し、コンクリートへ適用できる可能性が示唆できた。このシステムを実現するための方策を次のように考えている。レディーミクストコンクリート工場から出荷され戻ってきた戻りコンクリートや残コンクリートをヤードに広げてある程度固化させる。その後、一時破砕して骨材粒度に整える。その後、このレディーミクストコンクリート工場に近接する、燃料を燃やしている工場、例えばセメント工場やバイオマスエネルギー工場などへ製造した低品質再生骨材を運搬する。エネルギー排出工場の排気ダクトへつながる場所にて、骨材の CO₂ 吸着室を設けその中で CO₂ 吸着を実施する。高温であるため、吸着しやすいと考える。改質した骨材を、再びレディーミクストコンクリート工場へ運搬してコンクリート用骨材に置換してコンクリートを製造して出荷する。このようにすることで、エネルギー排出工場における CO₂ 削減をも

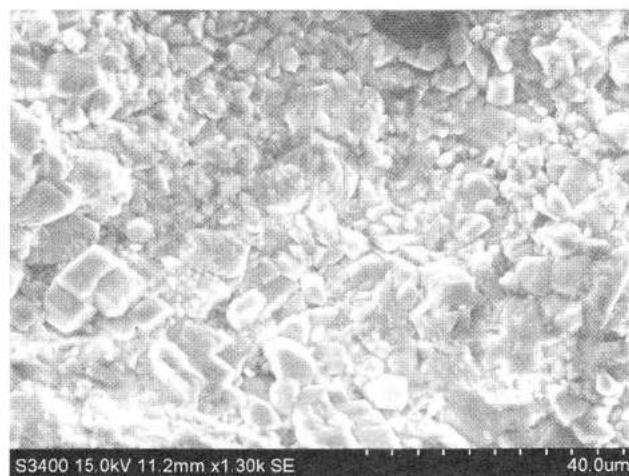


図-8 改質後の空隙内の生成物

実現可能であると考え、今後は、普通の骨材を使用したコンクリートの性能よりも低下させない再生骨材置換率を決定するなど必要があると考える。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 再生粗骨材および再生細骨材は、CO₂吸着により絶乾密度は増加し、吸水率は小さくなった。
- 2) 長さ変化率は、全ての配合において CO₂ 吸着による改善効果が確認された。また、粗骨材、細骨材に再生骨材を使用したコンクリートは、粗骨材のみ再生骨材を用いたコンクリートよりも長さ変化率は大きくなったが、CO₂ 吸着による改善効果は確認された。
- 3) CO₂ 吸着割合は、モルタル混入率の高いもので大きくなった。また、CO₂ 吸着割合が大きいものは、混入モルタル部分の緻密化の傾向が大きいものとする。
- 4) CO₂ 吸着割合の測定は、乾燥収縮の改善効果のある再生骨材を選別できる指標であると考えられ、再生骨材コンクリートの要求性能に合わせて CO₂ 吸着による改質を行うことで、低品質再生骨材の適用範囲の拡大に寄与できる可能性があるとする。
- 5) セメント工場などの排ガスを用いて強制炭酸化することで工場からの排出 CO₂ の削減とともに、若材齢コンクリートである戻りコンクリートを低コスト・低エネルギーにて低品質な再生骨材とし、炭酸化技術で簡易に改質することで環境負荷低減型のコンクリートの製造につながることを示唆できた。

謝辞

本研究は 2012 年度から 2014 年度における株式会社東京テクノおよび株式会社キャンパスクリエイトとの受委託研究にて執り行ったものである。実験に際し、当時の卒論生である亀山敬宏君、松田美奈さん、柳澤晃大君の協力を得ました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補修・解体・再利用における CO₂ 削減を目指して、コンクリートライブラリー第 134 号，2012
- 2) 松田信広，亀山敬宏，松田美奈，伊代田岳史：CO₂ ガスの強制吸着による低エネルギー型再生骨材製造方法の検討，コンクリート工学年次論文集，vol.36，No.1，pp.1732-1737，2014
- 3) 高橋祐一，黒田満，榊田佳寛，竹内博幸：再生骨材中の混入モルタル量の品質管理方法および評価基準の検討，コンクリート工学年次論文集，vol.35，No.1，pp.1453-1458，2013
- 4) 竹中寛，笠井哲郎：再生粗骨材の付着モルタルの物性が再生骨材コンクリートの品質に与える影響，コンクリート工学論文集，vol.19，No.3，pp.21-29，2008
- 5) 早川光敬，陣内浩，並木哲，飯島真人：再生骨材を用いたコンクリートの強度特性と耐久性，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp.1203-1208，2002